

Desarrollo de un laboratorio virtual para la medida de ciclos indicados de un motor alternativo policombustible de encendido provocado

Emilio Navarro Arévalo, Ignacio Martín García, Teresa Leo Mena⁽¹⁾

*Escuela Técnica Superior Ingenieros Aeronáuticos, Plaza Cardenal Cisneros 3
28040 Madrid, Universidad Politécnica de Madrid, 913366344, emilio.navarro@upm.es*

*⁽¹⁾ Escuela Técnica Superior Ingenieros Navales, Avda. Arco de la Victoria s/n
28040 Madrid, Universidad Politécnica de Madrid*

Resumen

Se ha desarrollado un laboratorio virtual para la medida de ciclos indicados en un motor alternativo policombustible de encendido provocado. El laboratorio virtual desarrollado permite por una parte simular y obtener el ciclo indicado de un motor alternativo de cuatro tiempos, pudiendo modificar los parámetros más importantes de operación (régimen de giro, presiones de admisión y escape, temperaturas, etc.) y de diseño (parámetros geométricos del motor). Por otra parte, el laboratorio virtual permite simular el ensayo del motor en banco de pruebas y la medida del ciclo indicado.

Los modelos matemáticos necesarios se han escrito en lenguaje Fortran, y estos interaccionan con un interfaz gráfico de usuario (GUI) programado en VEE®. El laboratorio virtual puede implementarse en una plataforma virtual de enseñanza de manera que los alumnos puedan tener acceso al sistema desde cualquier ordenador, en cualquier momento y desde cualquier lugar.

Palabras Clave: Laboratorio virtual, Motores alternativos, Ciclo indicado.

1. Introducción

La necesidad de la universidad a adaptarse a una enseñanza basada en modelos de aprendizaje, motivada por la integración en el Espacio Europeo de Educación Superior (E.E.E.S.) [1], requiere que los centros universitarios se involucren en la aplicación de nuevas formas de enseñanza-aprendizaje basados en una mayor interacción de los profesores con el alumnado, a una mayor implicación de los alumnos en el proceso enseñanza-aprendizaje y a una mayor complementariedad de los conocimientos teóricos y prácticos.

Esto último está íntimamente ligado a las prácticas de laboratorio que, además en el caso de las enseñanzas técnicas, representan el nexo de unión entre la teoría y el mundo real [2, 3].

Por otra parte, hay que considerar que la utilización de las tecnologías de la información y comunicación (TIC) tienen una gran aceptación por parte de los alumnos, por lo que empleándolas tanto para la formación presencial, como la semipresencial y a distancia están mostrando ser una herramienta muy importante en el proceso educativo, reforzando competencias específicas y transversales [4] y haciendo posible crear sistemas de aprendizaje basados en entornos virtuales [5, 6]. En particular, se pueden crear laboratorios virtuales mediante la utilización de programas de simulación realizados por el profesorado o bien mediante la utilización de programas comerciales. En ambos casos, se debe intentar que el laboratorio virtual recree la instalación experimental real y tenga un comportamiento similar, de forma que el alumno no fuese capaz de diferenciar una instalación de otra, salvo por el hecho de que en una de ellas trabaja delante de una pantalla de ordenador.

Los laboratorios virtuales presentan una serie de ventajas, frente las instalaciones reales, como son [7, 8]:

- Tener un coste relativamente bajo, lo que se traduce en la posibilidad de multiplicar el número de puestos de trabajo donde los alumnos puedan realizar las prácticas.
- Presentar un alto grado de robustez y seguridad, al no existir elementos reales que interfieran en el entorno.
- Disminuir la posibilidad de un uso incorrecto del equipamiento.
- Poder controlar un gran número de parámetros de diseño y operación que intervienen en el sistema simulado y analizar su respuesta ante el cambio [4].
- Poder realizar los ensayos experimentales cuantas veces sea necesario, con un coste mínimo.
- Poder utilizar el laboratorio virtual de forma remota, permitiendo a los alumnos la realización on-line de prácticas de laboratorio en cualquier momento y desde cualquier lugar.
- Poder utilizar por parte del profesor el modelo o laboratorio virtual en las clases presenciales de teoría para simular el sistema como si estuviese en la fase de diseño del mismo o bien simular su comportamiento en una fase de operación.

Considerando lo expuesto anteriormente se ha desarrollado un laboratorio virtual para la medida de ciclos indicados en un motor alternativo de encendido provocado, con

capacidad de operar con diferentes combustibles puros o mezclados (gasolina, etanol, metanol, gas natural e hidrógeno).

2. Laboratorio real para la medida de ciclos indicados

La instalación real para la medida de ciclos indicados de un motor alternativo (Figura 1) consta de un motor instalado en un banco de ensayo y de los instrumentos, transductores necesarios para realizar las medidas, acondicionadores de señal, equipos de control y medida, interfaces entre todos estos equipos y un ordenador, en cuya pantalla se visualizan las medidas, así como del software para controlar todo el sistema. El software se encarga de gestionar todo el sistema, realizar las medidas en el momento requerido y tratarlas posteriormente, almacenándolas, representándolas gráficamente, etc.

En el caso real se realizan medidas de las variables fundamentales de operación del motor (régimen de giro, par motor, gastos de aire y combustible, temperaturas, etc.) y de la presión en la cámara de combustión para cada posición del cigüeñal, obteniendo a partir de estas medidas el ciclo indicado (Figura 2) (diagramas presión-volumen y presión-ángulo de cigüeñal), el trabajo indicado, exponentes politrópicos, etc.



***Figura 1.** Banco de ensayo de motores alternativos*

Con estos ensayos experimentales se pretende que los alumnos conozcan la problemática que presenta una medida de esta índole, los distintos tipos de transductores de presión, las ventajas de utilizar unos u otros, las diferentes posibilidades de montaje en el motor, la conveniencia de obtener la señal de presión en base ángulo de cigüeñal, en lugar de base tiempo, el procedimiento para realizarlo

mediante codificadores angulares, la forma de adquirir la señal y como tratarla posteriormente.

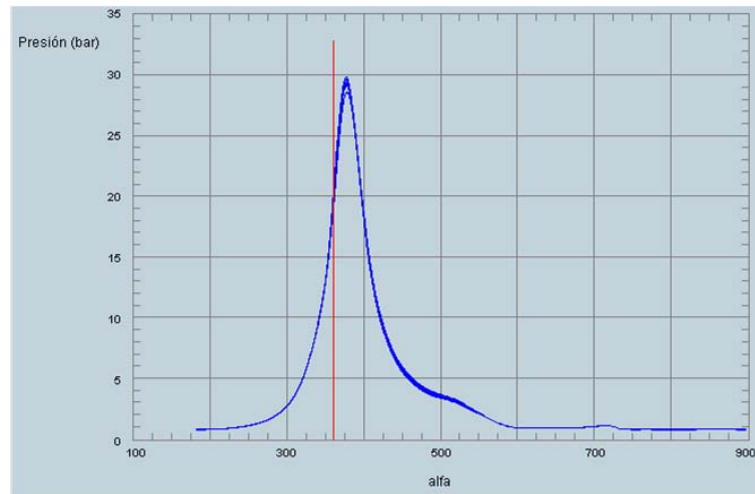


Figura 2. Ciclo indicado. Evolución de la presión con la posición del cigüeñal

3. Laboratorio virtual para la medida de ciclos indicados

Con el laboratorio virtual desarrollado se ha pretendido simular un banco de ensayos real en el que se hacen las medidas necesarias para obtener el ciclo indicado de un motor de encendido provocado. Con este laboratorio virtual, al igual que con el real, se pueden hacer estudios en los que se modifican los parámetros de operación del motor, pero a diferencia del laboratorio real, en este laboratorio virtual también es posible modificar parámetros de diseño del motor.

El laboratorio virtual se ha diseñado de manera que sea similar al real, tanto en su interfaz gráfico (GUI), como en el modo de operar el sistema y comportarse este. Así por ejemplo, el sistema tarda un cierto tiempo en estabilizarse ante cambios de operación del motor, los indicadores analógicos utilizados para medir las variables muestran variaciones debido a ruidos en las señales y también se ha utilizado un modelo que simula las oscilaciones cíclicas de presión que se producen en un motor real.

El desarrollo de los modelos de simulación utilizados se han realizado en lenguaje Fortran, y para la realización del GUI se ha utilizado VEE® [9]. Tanto los modelos de simulación como el GUI leen ficheros que contienen los datos de entrada (parámetros de operación y diseño) y escriben en ficheros los datos de salida, siendo el interface

gráfico el encargado de ejecutar los modelos en los momentos adecuados. Esta metodología permite aprovechar varias ventajas respecto a la utilización de otros sistemas y métodos:

- El lenguaje Fortran se puede considerar como un estándar, que casi no varía con el tiempo, a diferencia de otros paquetes de desarrollo que en sus versiones nuevas pierden la compatibilidad con versiones anteriores.
- Las posibles modificaciones a realizar con posterioridad en los modelos o en el GUI son más sencillas de realizar.
- El separar el modelo matemático del GUI permite una mayor versatilidad y posibilidad de cambio en el sistema.
- El utilizar ficheros de entrada y salida de datos permite ejecutar los modelos de forma independiente del GUI si fuera necesario.

VEE[®] es un entorno de programación gráfico utilizado en medida y análisis. Utiliza objetos para la programación lo que lo hace fácil de utilizar y muy versátil. Permite realizar cálculos, simulaciones, control de instrumentos, análisis de señales y puede interaccionar fácilmente con otros paquetes de software como hojas de cálculo, tratamientos de texto, etc.

Los modelos utilizados para simular el ciclo indicado y las oscilaciones cíclicas de presión son los descritos en las referencias [10-12] y consideran el proceso de renovación de gases, la formación de mezcla, los procesos de compresión, combustión y expansión, las oscilaciones cíclicas de presión y las pérdidas mecánicas del motor.

El laboratorio virtual permite modificar parámetros geométricos del motor, como son entre otros:

- Radio del cigüeñal.
- Calibre del émbolo.
- Lambda (relación entre la longitud de la biela y el diámetro del cigüeñal).
- Descentramiento relativo.
- Volumen de la cámara de combustión.
- Área mojada por los gases en la cámara de combustión.
- Relación de compresión.

parámetros geométricos del sistema de distribución:

- Angulo de avance a la apertura de escape (AAE).
- Angulo de retraso en el cierre de escape (RCE).
- Angulo de avance a la apertura de admisión (AAA).
- Angulo de retraso en el cierre de admisión (RCA).
- Diámetro de la válvula de admisión.
- Levantamiento máximo de la válvula de admisión.
- Número de válvulas de admisión.
- Diámetro de la válvula de escape.
- Levantamiento máximo de la válvula de escape.
- Número de válvulas de escape.
- Leyes de levantamiento de las válvulas de admisión y escape.

parámetros que intervienen en el proceso de combustión (ley de Vibe [13]), parámetros que intervienen en la ley de transferencia de calor a las paredes del cilindro (ecuación de Woschni [14]) y condiciones de operación del motor:

- Régimen de giro.
- Presión de admisión.
- Temperatura de admisión.
- Temperatura del refrigerante.
- Presión de inyección.
- Combustible utilizado.

La posibilidad de poder modificar todos estos parámetros hace del laboratorio virtual una herramienta muy útil en la enseñanza de los motores alternativos, ya que el alumno puede comprobar la influencia de esos parámetros en el comportamiento del mismo.

El laboratorio virtual permite calcular el valor del rendimiento volumétrico, el trabajo indicado, la presión media indicada, las emisiones de contaminantes, el ciclo indicado en función del ángulo del cigüeñal o del volumen, analiza los resultados del ciclo indicado, etc.

Como el laboratorio virtual va dirigido a los alumnos, también se han incluido otra serie de elementos a los que puede acceder el alumno y que mejorarán su aprendizaje: vídeo demostrativo, guión de prácticas para la realización de las mismas y guía de usuario.

4. El interfaz gráfico de usuario (GUI)

Al iniciar el programa se muestra una pantalla de bienvenida a la que sigue una pantalla con el menú principal (Figura 3), donde se puede acceder al vídeo demostrativo, al manual de utilización del software, al guión de las prácticas y al laboratorio virtual ("Práctica"). Esta última opción activa el laboratorio virtual y aparecen otras dos opciones (Figura 4). Una para la "Obtención de ciclos indicados", en la que se obtiene un único ciclo indicado para las condiciones de diseño y operación del motor especificadas (Figura 5), y otra ("Medida de ciclos indicados"), en la que se simula un banco de ensayos de motores alternativos y en el que se mide el ciclo indicado (Figura 8).

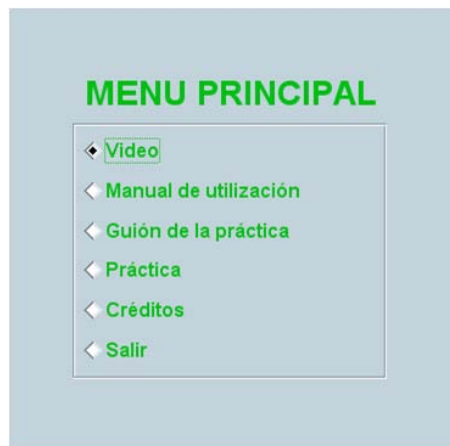


Figura 3. Menú principal del laboratorio virtual para la medida de ciclos indicados

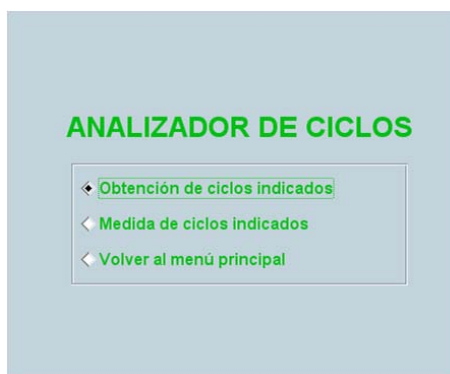


Figura 4. Menú de selección de la práctica

En la opción "Obtención de ciclos indicados" (Figura 4), y desde el interfaz gráfico se pueden modificar los valores de las variables de operación y diseño del motor y

visualizar los valores de los resultados obtenidos (Figura 5) de forma simple, marcando con el ratón los cursores correspondientes. Los resultados obtenidos se graban en un archivo, al que se puede acceder desde una hoja de cálculo (Figura 6), en la que se han programado los cálculos necesarios y las representaciones gráficas más importantes, de forma que sean fácilmente transferibles a otros programas como pueden ser tratamientos de texto.

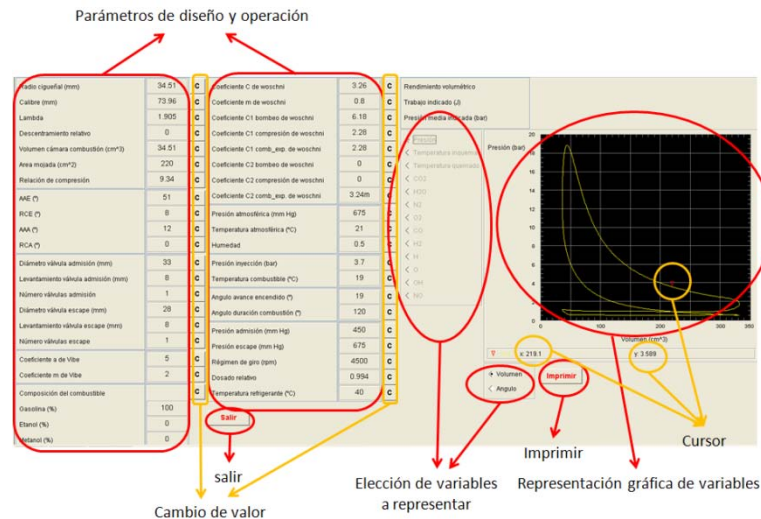


Figura 5. Opción de Obtención de ciclos indicados

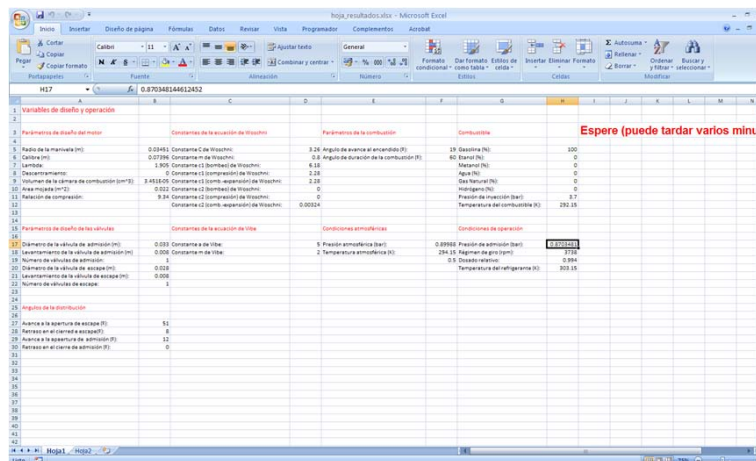


Figura 6. Primera hoja Excel en la que aparecen las características del motor y las condiciones de operación

En la opción “Medida de ciclos indicados” (Figura 4) se puede en primer lugar simular el banco de ensayo (“Medida de ciclos indicados”) y en segundo lugar analizar los registros de presión recogidos (“Análisis de ciclos indicados”) (Figura 7). Al escoger la primera opción aparece el panel de medida en el que se puede arrancar el motor o

pararlo, controlar el régimen de giro y la posición de mariposa del motor, conectar o desconectar el sistema de medida e iniciar la adquisición de datos de presión para la medida del ciclo indicado (Figura 8). Una vez hechas las medidas estas se graban en un archivo al que se puede acceder en cualquier momento con la segunda opción del menú ("Análisis de ciclos indicados"), analizando los datos (Figura 9).



Figura 7. Menú de Medida de ciclos indicados

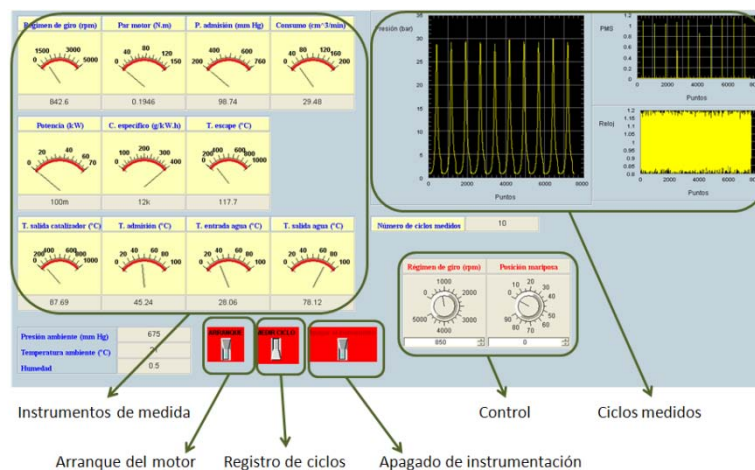


Figura 8. Pantalla de medida

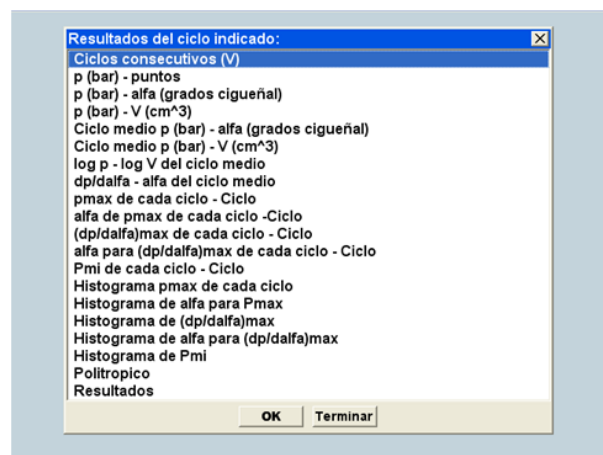


Figura 9. Pantalla de análisis de ciclos medidos

En las Figuras 10 y 11 se muestran alguno de los ciclos indicados obtenidos en un diagrama presión-volumen y presión-ángulo de cigüeñal, así como un detalle de ellos, en los que se aprecian las oscilaciones cíclicas de presión.

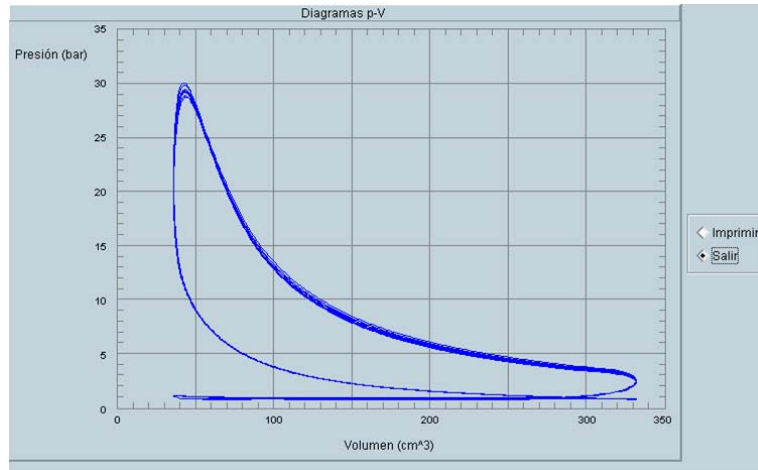


Figura 10. Ciclos indicados (presión-volumen) obtenidos

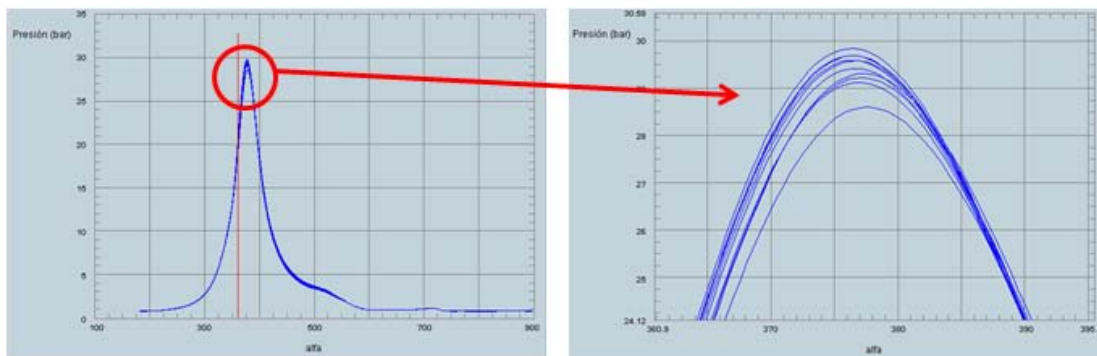


Figura 11. Ciclos indicados (presión-ángulo de cigüeñal) obtenidos y detalle de los mismos

5. Conclusiones

En el trabajo que se describe se ha desarrollado un laboratorio virtual para, por una parte, estudiar la influencia de parámetros de operación y diseño de un motor alternativo sobre el diagrama de presión en cámara (ciclo indicado) y por otra parte para simular la medida de dichos ciclos en un motor instalado en un banco de ensayo. Las razones para realizar el sistema han sido las siguientes:

- Permitir a los alumnos el acceso al laboratorio desde cualquier lugar y momento (acceso remoto), así como cuantas veces sea preciso.

- Favorecer el aprendizaje autónomo de los alumnos.
- Poder disponer de múltiples puestos de trabajo con un coste mínimo.
- Liberar al profesor de la docencia presencial, al poder realizar esta práctica el alumno de forma individual o en grupo pero sin la intervención del profesor.
- Poder utilizar el laboratorio como herramienta docente en el aula.

Las conclusiones que se extraen del desarrollo del laboratorio virtual son:

- El laboratorio virtual desarrollado representa una herramienta muy útil para el estudio del comportamiento del ciclo indicado en motores alternativos policombustible de encendido provocado, permitiendo variar multitud de parámetros que en una instalación real no podría hacerse.
- La estructura utilizada, en la que se han separado los modelos matemáticos de la programación del interfaz gráfico, permite cambiar y ampliar los contenidos de forma sencilla, adaptándolos a las necesidades de cada curso.
- El laboratorio virtual permite realizar la medida del ciclo indicado de manera similar a la de la instalación real, pero sin limitaciones en cuanto al tiempo de utilización de la instalación experimental, pudiendo realizar cuantas medidas se crean necesarias, todo ello con un coste mínimo.

Como conclusión final se puede afirmar que en un futuro no muy lejano el uso de laboratorios virtuales va a cobrar un peso importante en las enseñanzas técnicas, al permitir el aprendizaje autónomo del alumno, reducir costes y adaptarse a las nuevas directrices educativas establecidas.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Politécnica de Madrid la financiación de este proyecto, realizado a través de la convocatoria 2011 de "Ayudas a la innovación educativa en el marco del proceso de implantación del E.E.E.S. y la mejora de la calidad de la enseñanza".

7. Referencias

1. J. Iza, P.G. Encina, Water Sci. Tech., 49(8) (2004) 139.

2. Chu, R. H., & Lu, D. D. Project based lab learning teaching for power electronics and drives. *IEEE Transactions on Education*, 51(1), 108–113, 2008.
3. Ma, J., & Nickerson, J. V., Hands-on, simulated, and remote laboratories: a comparative literature review. *ACM Computer Survey*, 38(3), 1–24, 2006.
4. J. Bourne, D. Harris, F. Mayadas, *J. Eng. Educ.*, 94(1) 131, 2005.
5. G.V. Davidson, K.L. Rasmussen, *Web-Based Learning: Design, Implementation and Evaluation*, Pearson Merrill Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2006.
6. F. Giménez, W.D. Furlan, A. Pons, J.A. Monsoriu, ZPDESIGN: Un nuevo laboratorio virtual para el estudio de la óptica difractiva, *Actas del 17 CUIEET*, 2009.
7. Calvo I., Zulueta E., Gangoiti U., López J.M., *Laboratorios remotos y virtuales en enseñanzas técnicas y científicas*, Ikastorratza, Vol. 3, n. 3, pp. 1-21, 2009.
8. Emilio Navarro Arévalo, Teresa Leo Mena, Lydia Moral Grací, *Simulación de una Pila de Combustible para su Aplicación en un Laboratorio Virtual*, *Actas 18 CUIEET* (ISBN: 978-84-86116-19-4), 2010.
9. <http://www.agilent.es>
10. E. Navarro, T.J. Leo, P. Fernández, *Modelo de ciclo indicado para motores policombustible*, V JNIT Vigo 2007, ISBN 978-84-95046-30-7, 2007.
11. E. Navarro, T.L. Leo, *Desarrollo de un Laboratorio Virtual para el estudio del proceso de renovación de gases en un motor alternativo*, 8º Simposio Iberoamericano en Educación, Cibernética e Informática 2011, ISBN 978-1-936338-38-2, Vol. 2, pp. 167-171, 2011.
12. E. Navarro, Teresa J. Leo, Roberto Corral, *CO2 emissions from a spark ignition engine operating on natural gas–hydrogen blends (HCNG)*, *Applied Energy* (2012), doi: 10.1016/j.apenergy.2012.02.046.
13. Vibe II, *Brennverlauf und Kreisprozess von Verbrennungsmotoren*, Berlin: Verlag Technik; 1970.
14. G. Woschni, *A Universal Applicable Equation for the Instantaneous Heat Transfer Coefficient in the Internal Combustion Engine*, SAE Paper no. 670931, 1967.